

MOS界面特性安定化の研究

著者	塩野 登
号	906
発行年	1987
URL	http://hdl.handle.net/10097/11855

氏 名 ^{しお} 塩 ^の 野 ^{のぼる} 登

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 62 年 6 月 10 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 46 年 3 月

東北大学大学院工学研究科応用物理学専攻

修士課程修了

学 位 論 文 題 目 MOS 界面特性安定化の研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 西澤 潤一 東北大学教授 小野 昭一

東北大学教授 潮田 資勝

論 文 内 容 要 旨

本論文は、微細化・高集積化が進むMOS LSIの特性安定性・信頼性上の重要な問題である以下の研究項目について、筆者が新たに明らかにした事項を中心にまとめたものである。

- (1) MOS構造に存在する電荷の分類と性質の明確化及びその測定法
- (2) 薄い酸化膜のMOS構造の長期特性安定性
- (3) MOS構造の放射線損傷とアニール特性
- (4) 短チャネルMOSFETのホットエレクトロン不安定性

MOS構造に存在する電荷の分類と性質及び測定法に関し、4種類の電荷の性質とその測定法を明らかにした。特に、微細MOSデバイスのゲート酸化膜特性として重要な酸化膜トラップ電荷と界面トラップ電荷の測定・解析装置を開発した。

酸化膜トラップ電荷測定法として、Si基板内でアバランシェ降服により発生するキャリアを酸化膜中へ注入するアバランシェキャリア注入法を取り上げ、測定解析装置を開発し、酸化膜トラップの捕獲断面積と実効密度の算出を可能とした。界面トラップ密度測定法として、測定および解析が容易で、短時間にかつ高精度に求められる低周波C-V法(Quasistatic C-V法)の自動測定解析装置を開発した。界面トラップ密度算出に不可欠なゲート電圧とバンド曲り関係における付加定数の算出法として、Quasistatic C-V特性を全ゲートバイアス領域で積分し、バンドギャ

ップエネルギーと比較する方法を提案した。この測定法により、バンドギャップ中央付近で $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ の高い測定精度を得ることができた。

薄い酸化膜のMOS構造の長期特性安定性に関し、バイアス・温度(BT)エージングによる固定電荷密度と界面トラップ密度変動現象、変動機構、MOSFET特性への影響を明らかにした。特に、ゲート電極に正電圧を印加し温度を上げる+BTエージングにより界面トラップ密度が増加するという新現象(+BT不安定性)を見出し、その特性を明らかにした。

+BT不安定性は、界面トラップ密度のみが増加する現象であり、界面トラップ密度と共に固定電荷密度が増加する-BT不安定性とは異なる。界面トラップ密度分布において、+BTでは、Siバンドギャップ内の伝導帯よりの上半分にのみ増加し、そのピークが価電子帯端上約0.7 eVに生じる。この界面トラップはアクセプタ型である。これは、界面トラップ密度増加による V_{FB} 変動はN型基板試料に現われ、P型基板試料に現われないことから確かめられた。また、+BTによる界面トラップ密度増加は、-BTに比べ、高温・高電界・長時間のエージングにより顕著になる。

+BTによる界面トラップ密度増加機構として、正バイアスと温度の作用により、歪を受けているSi-SiO₂界面近傍のSi-O結合の結合距離が変化し、弱いSi-O結合(Si-O結合間距離が正常結合より長い結合)が生じ、これが界面トラップの発生源となるモデルを提案した。

+BTによる界面トラップ密度増加現象は、nチャネルMOSFETのしきい値電圧を正方向に変動させ、サブスレシホールド特性の傾きの逆数($\alpha \equiv dV_{GS}/d \log I_{DS}$)も増加させる。これは、バンドギャップ上半分に増加したアクセプタ型界面トラップが、バンド曲りに依存して負に帯電するためである。

MOS構造の放射線損傷とアニール特性に関し、損傷の照射時ゲートバイアス依存性、損傷機構、損傷のアニール特性、損傷低減化ゲート酸化膜形成法を明らかにした。特に、放射線により新たに発生する中性電子トラップの性質を明らかにした。

正電荷発生は、放射線照射により発生したSiO₂膜内の電子-正孔対の内、正孔がSiO₂膜内に存在する正孔トラップに捕獲されることによる。SiO₂膜内に存在する正孔トラップは、酸化膜3価Si(O \equiv Si \cdot)欠陥である。正電荷発生量は、照射時のゲートバイアスが約2 MV/cmの電界強度で最大となり、初期 V_{FB} と同じバイアスで最小となる。これは、放射線照射によるSiO₂膜内の正孔発生量、膜内の移動、そして正孔捕獲断面積の酸化膜電界強度依存性の兼ねあいとして説明される。

界面トラップ密度増加は、正ゲートバイアス印加中の照射で発生し、負ゲートバイアス印加ではほとんど発生しない。これは、界面トラップ発生は正孔とSi-H結合、Si-OH結合、あるいは歪を受けているSi-O結合との反応による3価Si(Si \equiv Si \cdot)や弱いSi-O結合の生成に起因し、正孔がSi-SiO₂界面へ移動する正ゲートバイアス下でこの反応が促進されるためである。

中性トラップは、放射線照射により新たに発生するトラップである。照射後は無帯電状態であるが、電子が注入されるとキャリアを捕獲し帯電するトラップであり、その捕獲断面積は $10^{-15} \sim 10^{-16}$

cm²である。その発生機構は、放射線照射によりSi-O結合が破壊され、電子-正孔対が生成するが、消滅時の再配置が起こる際に元の原子位置より僅かにずれ、双極子状の欠陥が発生するためと考えられる。

放射線損傷のアニール特性に関しては、界面トラップは約400℃、正電荷は約500℃、そして中性トラップは約700℃のアニールにより消滅する。しかし、放射線照射無し試料と同程度の長期安定性を得るには1000℃程度の高温アニールが必要である。

耐放射線性に強いゲート酸化膜形成法は、900～1000℃付近で形成するドライO₂酸化である。また、薄い膜ほど耐放射線性は向上する。

短チャネルMOSFETのホットエレクトロン不安定性に関し、V_T・V_{FB}変動のエージング条件依存性、変動機構、そして0.8μmのn-MOSFETのホットエレクトロン制限の安全動作電圧領域を明らかにした。

基板ホットエレクトロンのゲート酸化膜への注入により正方向のV_T・V_{FB}変動が生じる。この際、V_T変動量がV_{FB}変動量よりも常に大きい。これは、V_T変動にはSiO₂膜内の電子捕獲の他、電子注入により発生したアクセプタ型界面トラップによる負電荷の効果が付加され、V_{FB}よりもより正方向に変動するためである。基板ホットエレクトロンを捕獲するSiO₂膜中の電子トラップは、正の固定電荷センタであり、電子捕獲断面積は約10⁻¹³cm²である。

短チャネルMOSFETに、高ドレイン電圧・ゲート電圧を印加し通電する場合、チャネルホットエレクトロン注入による正のV_T変動、コンダクタンスの劣化が生じ、V_T変動量は1V以上にも達する。これは、注入電子数が多いため、正の固定電荷センタでの電子捕獲の他、中性トラップへの電子捕獲効果が現われるためである。この中性トラップに捕獲された電子は、150～200℃のアニールにより放出される。

チャネル長0.8μmのn-MOSFETのホットエレクトロン不安定性の起こらない安全動作領域は、V_{DS}=V_{GS}=5.5V以内である。サブミクロンMOSデバイスを現状の5V電源で動作させることは、ホットエレクトロン不安定性が大きな問題となり、デバイス構造の改良や電源電圧の低下等の対策が必須である。

表1 各種ストレスによる電荷発生と構造モデル

ストレス	発生電荷	構造モデル
+BT	・界面トラップ (アクセプタ型)	Si≡Si--O (弱い酸素結合)
-BT	・正の固定電荷 ・界面トラップ	0≡Si _s ⁺ (界面の酸化膜三価Si) Si≡Si・(三価Si)
放射線	・正電荷(正孔トラップ への電子捕獲) ・界面トラップ ・中性電子トラップ	0≡Si ⁺ Si≡Si--O及び Si≡Si・ SiO ₂ 膜内の双極子状 欠陥
基板ホット エレクトロン	・正電荷の消滅(正の固定 電荷中心への電子捕獲) ・界面トラップ	0≡Si _s ⁺⁻ Si≡Si--O
チャネルホット エレクトロン	・正電荷の消滅(正の固定 電荷中心への電子捕獲) ・負電荷(水分に関連した 中性トラップへの電子捕獲) ・界面トラップ	≡Si _s ⁺⁻ 0≡Si-OH ⁻ Si≡Si--O及び Si≡Si・

以上の実験結果・考察を基に，MOS 構造の各種ストレス（BT，放射線，ホットエレクトロン）による電荷発生構造モデルを提案した。表 1 にそのモデルをまとめ示す。

以上の研究成果は今後一層進展する微細化 MOS LSI の特性安定化を図るうえで重要な指針となるものである。また，開発した MOS 電荷の測定・解析法，明確化した各種ストレスにより発生する電荷の性質・プロセス依存性，その発生機構モデルは，MOS 構造内に存在する各種電荷特性のより深い理解と電荷制御法を提供するものである。

審 査 結 果 の 要 旨

酸化膜を金属と半導体の間に挟んだいわゆるMOS構造は、現在、集積回路構成の主流をなしている。しかし、このような結晶系すら異なり互いに固溶し合う材料を組み合わせた系では、当然予想されるように、界面を中心に甚だ複雑な構造を形成することとなり、準位の種類と分布もまた甚だ複雑となる。しかし、長い間、準位は専ら界面に集中していて、分布していないとする考えがつよく、分布を考えての追求は殆どなされていなかった。本論文は、特に酸化膜中に分布して形成される準位を中心として追求してきた研究の成果をまとめたもので、序論と総括とを併せて6章よりなる。

第1章では、先ず、従来の研究経過とそれらの結果に対する現在の標準的な解釈について概説している。第2章から本論に入り、MOS構造の界面付近に分布する準位とそれに捉えられて存在する電荷の分類を行い、それらの測定法及び原理についてまとめている。ここで特に、キャリアなどにより酸化膜中に電荷を注入し、酸化膜中の捕獲された電荷密度を低周波の静電容量測定によって求める方法を提案しているが、これは有効な研究手法を開拓したものといえる。

第3章は、上記の方法を中心として、薄い酸化膜中の電荷密度の安定性を評価し、その解析を行った結果をまとめたものである。すなわち温度を上げて直流電圧を加えたときの安定性が、時間と共に如何に変わるか、そしてこれが酸化膜の作りかた、厚み、基板としたシリコンの電導型と如何に関連するかについて詳しく測定した結果を示している。これらは重要な知見である。

第4章では、前章までの結果に基づき、放射線照射による損傷が惹起する欠陥の準位を測定した結果、及びその結果から、欠陥の構造を解明した一連の考察についてのべている。損傷によって酸化膜中に正電荷が発生し、また、シリコンと酸化シリコン界面に捕獲電荷がまし、酸化膜中には中性の捕獲準位も形成されることを示したのは新しい知見である。またそれらの生成機構について論じ、低減法として900～1000℃で乾燥酸素による酸化膜作成が有効なことを示している。

第5章では、短チャンネルデバイスに起こりがちなホットエレクトロン注入効果による特性不安定について論じ、上記の結果が充分応用できることを示している。第6章は結論である。

以上要するに本論文は、MOS構造の特に酸化膜中の捕獲準位の形成とそれらの特性について数々の新しい解釈と知見を加え、その構造解明への第一歩を印したもので半導体工学に資するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。